干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

巴丹吉林沙漠东南缘末次冰期沉积物地球化学特征及气候指示意义

范小露[1,2]， 张新毅[1,2]， 田明中[3]

（1. 阜阳师范大学历史文化与旅游学院地理系，安徽 阜阳 236037；2. 阜阳师范大学皖北文化研究中心，安徽 阜阳 236037；3. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083）

摘 要：沙漠古气候重建对于了解区域古气候演变具有重要意义。通过以巴丹吉林沙漠东南缘巴润宝日陶勒盖（BRBG）剖面为研究对象，进行全样地球化学、分组分分粒级元素地球化学及Sr同位素分析，重建该地区末次冰期期间（66.8~41.0 ka）的气候演化模式。研究表明：66.8~41.0 ka呈现残留组分高Sr/Ca值、酸溶组分及残留组分低Ba含量特征，指示化学风化增强及湖泊补给量增加，反映暖湿气候特征。微量元素变化特征指示沉积物细粒组分中的微量元素指标对气候的敏感度高于粗粒组分。Sr同位素结果显示酸溶组分中$^{87}Sr/^{86}Sr$值在66.8 ka附近达到最大值，可能与湖水盐度升高相关。此外，几乎所有指标均指示在41.0 ka前后存在一次气候突变事件，研究认为巴丹吉林沙漠东南缘41.0 ka前后从暖湿突变为干冷气候可能是该时期的西伯利亚高压系统增强所致。

关 键 词：末次冰期；地球化学；古气候；西伯利亚高压；巴丹吉林沙漠

文章编号：

巴丹吉林沙漠作为我国西北干旱区的典型代表，地处青藏高原、蒙古戈壁、黄土高原等几大巨型地貌单元分界处，是研究古地理变迁与构造演化的理想场所。同时，作为西风带与季风的汇聚过渡带，巴丹吉林沙漠亦是研究古气候与古环境变迁的关键地区[1–3]。作为世界唯一一个高大沙山密集型沙漠，巴丹吉林沙漠内部以“沙山—沙间湖”为典型地貌分布特征。诸多学者对于巴丹吉林沙漠的研究聚焦点亦是沙山形成原因[4–5]、湖泊演化模式[6–7]、地下水补给机制[8–9]、物源区分析[10–12]、地表风化[13]等，其中关于古气候演化方面的研究多数集中在更新世–全新世[14–16]，关于末次冰期期间的具体研究则相对较少。巴丹吉林沙漠作为西北地区的典型生态脆弱带和气候敏感区，加之受黄土高原、青藏高原、蒙古戈壁等巨型地貌单元的影响，其沉积记录中的气候指标有着重要的参考价值。本文选择巴丹吉林沙漠东南缘一沉积露头——巴润宝日陶勒盖（BRBG）剖面为研究对象，采用全样、分组分分粒级地球化学方法进行主微量元素及同位素测定，综合多个主微量元素指标，分析了末次冰期期间的沉积物记录特征及其反映的古气候信息，并进一步探讨了末次冰期期间气候突变的成因机制。

1 研究区概况

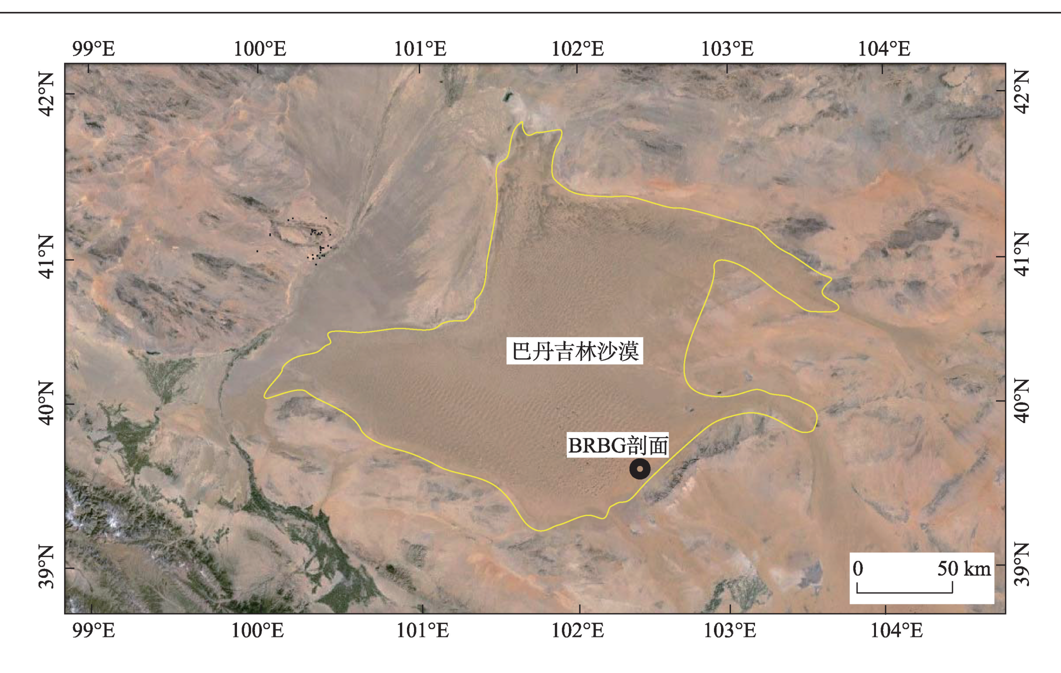
巴丹吉林沙漠位于中国西北干旱区（图1），行政归属于内蒙古自治区阿拉善右旗，东起宗乃山，西邻若水，北接拐子湖，南屏北大山，总面积50510 km^2，作为中国第三大沙漠，拥有世界上最高的沙山，也是唯一的沙山群密集的沙漠，高大沙山覆盖沙漠面积60%。受内蒙古高压影响，巴丹吉林沙漠常年呈现冬季寒冷干燥、夏季炎热的大陆性气候特征，降

收稿日期：2019-10-03； **修订日期：**2019-12-25

基金项目：国家自然科学基金（41572094）；阜阳师范大学青年人才基金重点项目（rcxm201907）；阜阳师范大学科学研究项目（2018FSKJ08ZD）；阜阳师范大学博士科研启动基金（2016kyqd0004）；安徽省高校人文社科重点研究基地阜阳师范大学皖北文化研究中心2020年度重点项目（SK2020A0311）资助

作者简介：范小露（1987–），女，讲师，主要从事第四纪地质学与气候演变等方面的研究. E-mail: atsunnyshore@126.com

通讯作者：张新毅（1989–），男，工程师，主要从事沉积学等方面的研究. E-mail: xinyiz0117@163.com



注:BRBG剖面为巴润宝日陶勒盖剖面。下同。

图1 研究区及剖面位置图

Fig. 1 Study area and section location map

雨主要集中于6—9月,为突发性暴雨,降雨量呈现南多北少特点。研究区常年光照充足,年温差及日温差较大,相对湿度小,蒸发量大。高大沙山间分布有小型湖泊,据统计,整个沙漠拥有142个湖泊,总面积22.3 km^2[17],其中90%湖泊为咸水湖,仅少数分布于沙漠东南缘的湖泊为淡水湖[18]。从构造背景来看,巴丹吉林沙漠归属阿拉善地台凹陷盆地,侏罗纪至新近纪地层出露于凹陷盆地边缘,凹陷盆地内部风成沙下主要发育第四纪沉积物[19]。

2 材料与方法

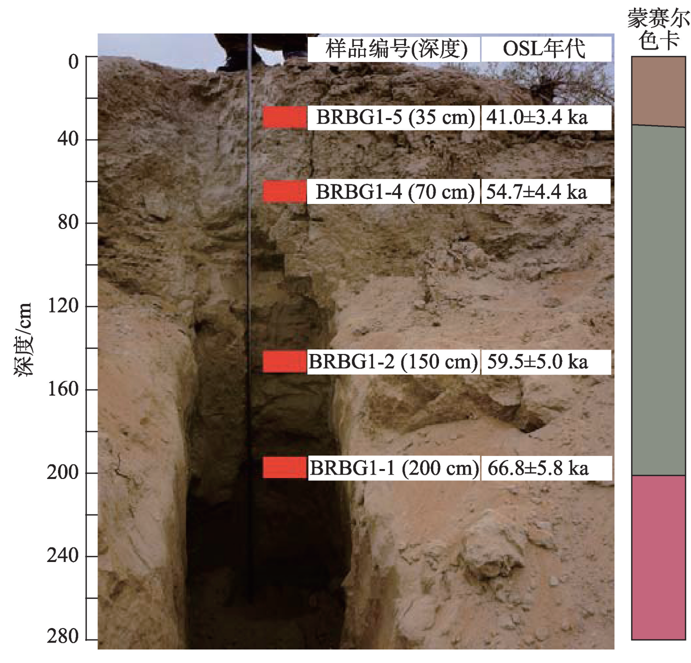
2.1 研究剖面

巴润宝日陶勒盖(BRBG)剖面位于巴丹吉林沙漠东南缘(39°36′04″N,102°28′38″E),位于巴润宝日陶勒盖鸣沙山东侧,毗邻一个萎缩中的现代湖泊,为一典型沉积露头,露头表层覆盖大量钙质根管(图2)。根据野外观察及沉积学特征,剖面层理清晰,综合考察判断地层是连续的,剖面可分为3层:0~35 cm,黄棕色细沙为主,含有粉沙和黏土,顶部层位含有钙质的根管,平均长度约5 cm,直径大约0.3 cm,底部由于植物根系浸染呈黄褐色;35~200 cm,绿灰色中细沙为主,胶结程度低,含水量高,压实明显,局部含有钙质根管;200~280 cm,灰红色粗砂细砾层,总体成分接近附近高达沙山迎风面沙粒。前期研究工作已通过光释光(OSL)定年,确定了剖面的年代框架:剖面35 cm、70 cm、150 cm、200 cm对应年代分别为41.0 ka、54.7 ka、59.5 ka和66.8 ka[20]。

2.2 研究方法

巴润宝日陶勒盖(BRBG)剖面深达280 cm,每5 cm为一层,共分为56层,从地下5 cm处开始采样,每层采样1个,共得到地球化学测试样品56件。全样微量元素测试实验完成于河北省区域地质矿产调查研究所测试实验室,所用仪器为电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),型号X Serise 2。元素分析按照GB/T 14506.28-2010标准执行,其中含量>10×10^{-6}的元素精度优于5%,含量<10×10^{-6}的元素精度优于10%。微量元素共分析5种元素,分别为Rb、Sr、U、Th、Ba。

分组分分粒级地球化学测试样品56个,每个样品过筛子分为>125 μm和<125 μm粗细两套组分,56个原始样品以125 μm粒径为界线值,每个样品一分为二共得到测试样品112个,对112个样品测试酸溶组分和不溶组分两部分。测试地点为中国地质科学院国家地质实验测试中心,采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)。用取样品0.5 g放进离心管,称取国际标准土样0.5 g,并准备空白样离心管进行比对和校正。样品采用HAc(醋酸)进行溶解,将离心管进行水浴恒温振荡器进行



上层：黄棕色中砂和细沙为主，含有一定的细粒成分如粉砂和黏土。该层顶部有钙质根管，平均长度约为5 cm，直径约0.3 cm，下部有植物根系作用形成的黄褐色浸染，中间夹杂1~3 mm不等的钙质结核。

中层：绿灰色中砂和细沙为主，无层理发育，胶结程度很差，但沙层内含水丰富，由于水的存在使得沙层之间压实明显。由于原有植物根系生长使得上部铁元素通过淋滤将层面局部浸染为黄色。该层局部也发现钙质根管，但其体态均小于上层的钙质根管，其平均长度仅有2 cm，直径小于0.2 cm。100 cm以下，未发现钙质根管和钙质结核。

下层：灰红色粗砂或细砾层，下部灰红色沙子与高大沙山迎风面广泛分布的非常相似。

图2　BRBG剖面层序、蒙赛尔色卡比对及年代图[18]

Fig. 2　BRBG profile sequence, MSCC and chronology[18]

振荡，HAc淋洗，HNO_3定容。分离上清液和残留物，对残留物利用HF、HNO_3和$HClO_4$进行硝化溶解，而后定容待测。

Sr同位素测试场所为南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室，所用测试仪器为FinniganTriton TI型TIMS，以NBS987为标准。样品研磨至200目，取沉积物样品200 mg，取盐酸进行常温溶解，反应完成后分离残渣和上清液，将样品进行蒸干处理。离心分离后，透明上清液部分是可溶组分，底部残渣部分即残留组分。蒸干后的底部残渣使用HF和HNO_3溶解，用AG50W阳离子交换树脂经酸反复淋洗纯化Sr。测试样品4个，分酸溶组分和不溶组分。

3　结果与分析

3.1　全样地球化学

全样微量元素结果(图3)显示：BRBG剖面上层(0~35 cm)微量元素含量波动明显，在15~20 cm处Rb、Sr、Ba、Th、U含量及Rb/Sr、Sr/Ba比值变化明显；中层(35~200 cm)微量元素含量均存在多期波动，但120~200 cm段Sr含量、Rb/Sr及Sr/Ba比值无明显变化；下层(200~280 cm)Rb、Ba、Th含量及Th/U比值存在4~5期波动，但Sr和U含量、Rb/Sr和Sr/Ba比值均无明显波动。作为典型分散元素，Rb元素多数赋存于云母及黏土矿物，由图3可见BRBG剖面中层黏土矿物含量明显高于上层及下层。Sr元素主要以类质同象形式替代Ca元素赋存于碳酸盐矿物中，上层碳酸盐矿物含量明显存在增高趋势。Ba元素及Sr/Ba比值主要反映湖水盐度变化，低Sr/Ba值指示温暖湿润气候条件，高Sr/Ba值则指示干旱气候条件[21]，可见盐度在上层有明显升高的趋势。U和Th化学行为不同，U易淋滤流失，而Th易粘附于稀土矿物，且Th/U比值可用于判断氧化还原条件[22]。图3显示中下层U的流失量明显大于上层，Th含量呈现中层高顶底低的趋势，Th/U比值从顶到底连续增高。

3.2　分组分分粒级地球化学

分组分分粒级地球化学分析利用粒级和组分2个标准将样品细化为4类：粒径>125 μm酸溶组分、粒径>125 μm残留组分、粒径<125 μm酸溶组分和粒径<125 μm残留组分。结果显示微量元素Ba与Sr在粗粒样品(图4和图5)中含量比细粒样品(图6和图7)中低，主量元素Al和K在残留组分(图5和图7)中含量比酸溶组分(图4和图6)高，说明微量元素Ba与Sr在细粒组分中含量更高，主量元素K和Al主要赋存于硅铝酸盐矿物中。Ba元素在酸溶组分(图4和图6)和粒径<125 μm残留组分(图7)中3段式特征明显，Sr元素在粒径<125 μm残留组分(图7)中3

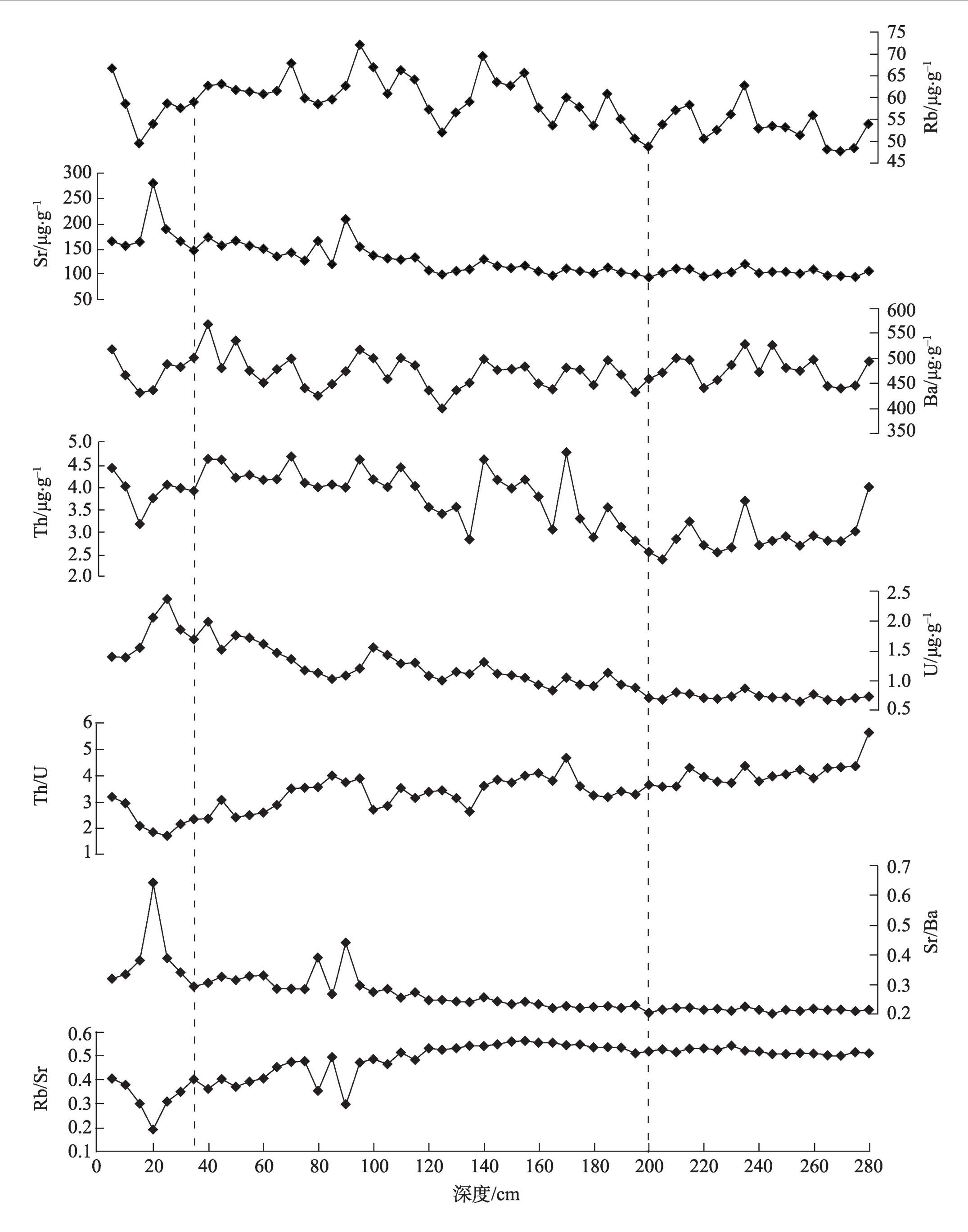


图3 全样地化微量元素含量特征图

Fig. 3 Trace element content characteristic map of whole sample geochemistry

段式特征明显；Al与K元素变化基本同步，且在粒径>125 μm酸溶组分（图4）和粒径<125 μm残留组分（图7）中具有3段式特征；Sr/Ca在粒径<125 μm残留组分（图7）响应野外地层露头3段式分法明显。总体而言，无论是酸溶部分还是残留部分，细粒样品(<125 μm)对于气候环境变化的响应更为明显。

3.3 锶(Sr)同位素

测试结果显示粒径>125 μm残留组分中$^{87}Sr/^{86}Sr$值明显高于粒径>125 μm酸溶组分中$^{87}Sr/^{86}Sr$值，Sr同位素比值($^{87}Sr/^{86}Sr$)随深度变化趋势在残留组分和酸溶组分中呈相反变化趋势（图8），200 cm处$^{87}Sr/^{86}Sr$出现明显转折。残留组分中$^{87}Sr/^{86}Sr$值变化范围为0.7178~0.7195，平均值0.7186，接近地壳硅铝质岩石0.7200，可能与研究区周围宗乃山、雅布赖山、北大山等提供物源有关。酸溶组分中$^{87}Sr/^{86}Sr$变化范围为0.7117~0.7136，均值0.7126，与现代海水及海相碳酸盐$^{87}Sr/^{86}Sr$值(0.7092)接近[23]，推测与沉积露头形成前的咸水湖环境有关。残留组分中$^{87}Sr/^{86}Sr$

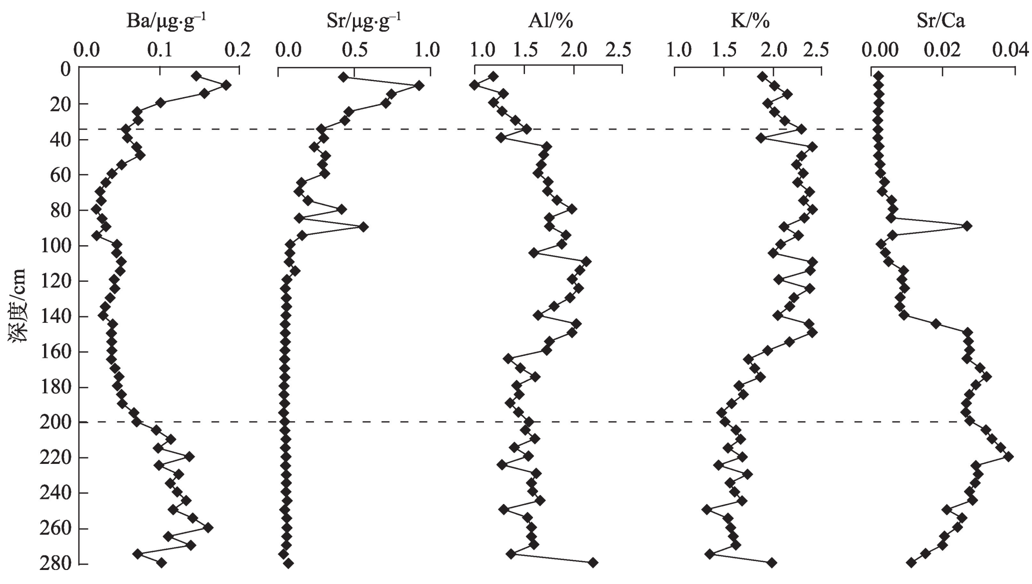


图4　粒径>125 μm酸溶组分元素指标随深度变化特征图

Fig. 4　Characteristic diagram of element index of >125 μm acid soluble components with depth

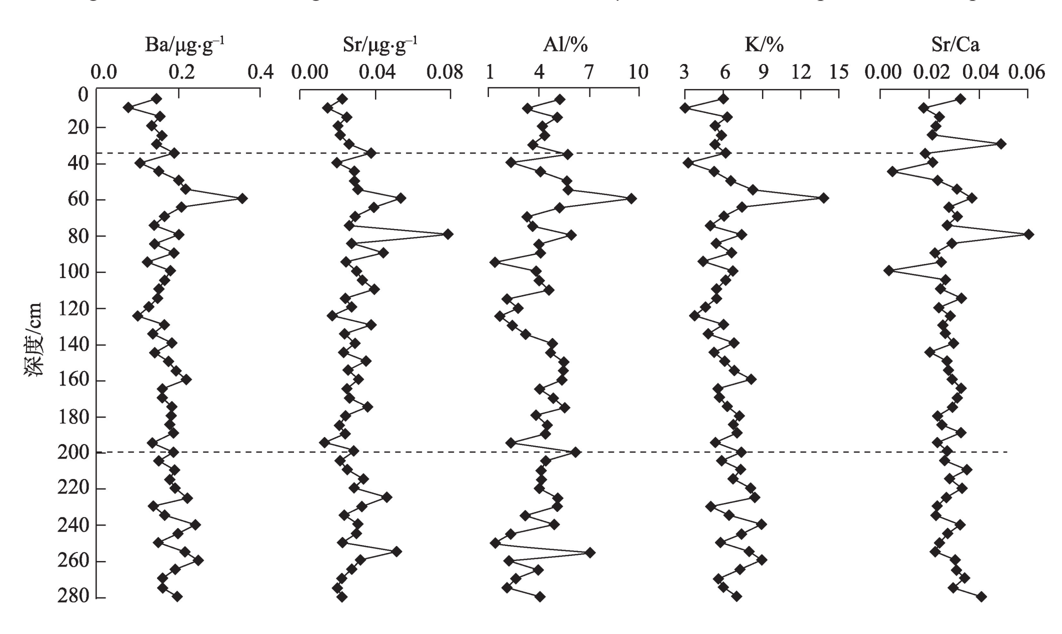


图5　粒径>125 μm残留组分元素指标随深度变化特征图

Fig. 5　Characteristic diagram of element indexes of >125 μm residual components with depth

值在200 cm以下及110 cm以上基本稳定，指示基本稳定的物源供给区及供给量，200~110 cm之间随深度变浅 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值持续升高，指示物源区风化强度变大。酸溶组分中 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值在200 cm处达到最大值，推测与湖水盐度升高有关。

4　讨 论

巴丹吉林沙漠内部以高大沙山与沙山间湖泊交替出现为典型地貌特征，研究区内BRBG剖面所在位置为巴润宝日陶勒盖鸣沙山东侧一萎缩中的现代湖泊边缘，已有研究结果显示，剖面所处位置可能为一沙漠湖泊的滨湖高地或湖心岛[24]，据野外考察，剖面所在湖泊为一典型沙漠内陆盐湖，其水补给模式与巴丹吉林沙漠内部诸多盐湖一样，仅依靠降雨和地下水补给[8]。因此，BRBG剖面所记录的沙漠湖泊变化在一定程度上反应了研究区气候的变化。

从野外观察结果来看，BRBG剖面呈现明显的“棕-灰-红”3层，顶底层呈氧化色，中间层呈还原色，考虑到底层红色沙砾层与鸣沙山组分的相似

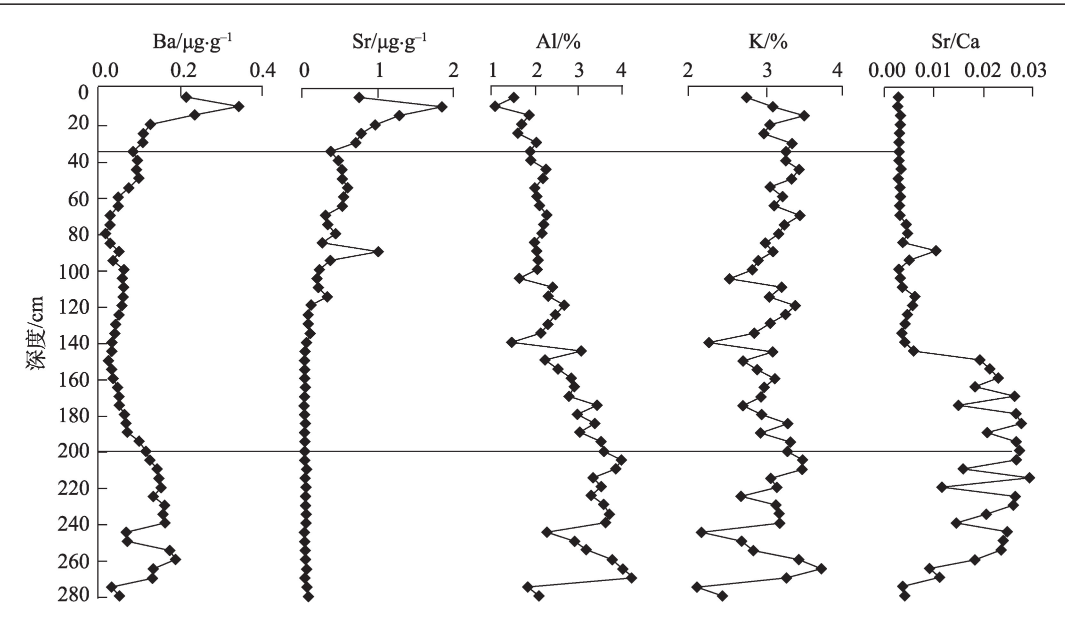


图6 粒径<125 μm酸溶组分元素指标随深度变化特征图

Fig. 6 Characteristic diagram of element index of <125 μm acid soluble components with depth

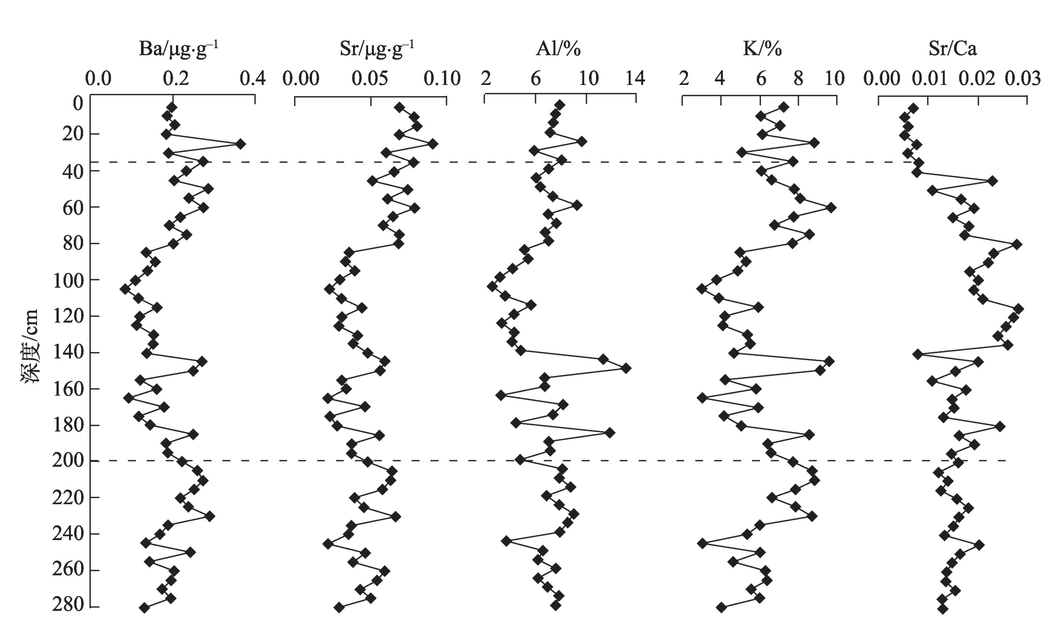


图7 粒径<125 μm残留组分元素指标随深度变化特征图

Fig. 7 Characteristic diagram of element indexes of <125 μm residual components with depth

性，底层可能形成于盐湖形成之前或原始湖泊范围之外，后期湖泊扩张，湖泊升高之后方沉积中层和顶层。3段式分层结果，在微量元素Ba和Sr、主量元素Al和K及Sr/Ca中均有明显呈现。66.8 ka之前（即200~280 cm），因物质组成、粒度、颜色等方面与附近高大沙山的相似性[20]，初步判定为古湖泊基底，即该层形成于古湖泊形成之前。因此，对于气候突变的研究，对象选择为中上层（0~200 cm），以湖泊沉积物中气候记录为主。41.0~66.8 ka（即35~200 cm）呈现残留组分高Sr/Ca值、低Ba含量（酸溶组分及残留组分）、酸溶组分低$^{87}Sr/^{86}Sr$值及残留组分高$^{87}Sr/^{86}Sr$值，指示化学风化增强、雨水增加、湖泊补给量增加、湖泊扩张，反映暖湿气候特征。41.0 ka之后（即0~35 cm），呈现高的全样Sr/Ba比值、低的细粒（<125 μm）残留组分Sr/Ba比值、高的细粒（<125 μm）酸溶组分高Ba含量和高的细粒（<125 μm）残留组分Ba含量等特点，反映化学风化作用减弱、物理风化作用增强、湖泊浓缩、盐度升高，总体指示气候向干冷方向转变。

值得注意的是，几乎所有元素指标，无论是全

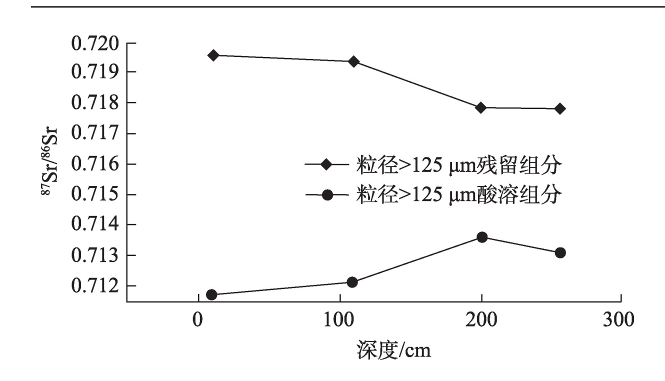


图8　Sr同位素比值随深度变化图

Fig. 8　Changes of Sr isotope ratio with depth

样元素或是分组分分粒级元素，在41.0 ka前后，均存在指标突变，即气候在此发生转型。综前所述，41.0 ka前后，气候总体由暖湿向相对干冷方向转变，湖泊萎缩，湖水浓缩，盐度升高。对于巴丹吉林沙漠41.0 ka前后的气候突变，结合研究区位置及诸多学者的前期研究成果，推断主要原因可能有以下2种：（1）高原隆升成因，即巴丹吉林沙漠东南缘41.0 ka前后的气候突变主要由南部青藏高原在该段时间内的强烈隆升引起[25]；（2）气压系统增强成因，41.0 ka前后气候突变主要源于该段时间内研究区北部西伯利亚高压系统增强[26]。高原隆升成因的根本在于印度季风对青藏高原及高原以北地区降水量的影响，150.0 ka以来的共和运动使得青藏高原达到了如今的海拔，成为阻挡西南暖湿气流进入中国西部的天然屏障[27]，80.0~35.0 ka青藏高原发生剧烈的构造隆升致使错鄂湖等地缺失该时期的沉积层位[25]，所以，巴丹吉林沙漠在41.0 ka左右的气候突变有可能是青藏高原隆升阻碍西南暖湿气流进入高原以北所致。另一可能成因为巴丹吉林沙漠北方的气压系统变化，即西伯利亚高压在41.0 ka发生突变。西伯利亚高压系统处于研究区北—东北方，在MIS 3阶段（40.0~27.0 ka）发生显著增强[26]，粒度指标研究成果指示黄土高原[28]、天山[29-30]等中国北方地区在40.0 ka附近均受到西伯利亚高压增强的影响，因此，同处中高维度带的巴丹吉林沙漠在41.0 ka的气候突变亦可能是受西伯利亚高压增强所致。相对而言，笔者更支持气压系统增强成因，青藏高原隆升的速度与时间节点问题，虽然已有研究支持青藏高原在65.0 Ma印度板块与欧亚板块碰撞以来的隆升速度很快，世界第三极从无到有，从汪洋大海至世界屋脊用时之短令人惊讶，但青藏高原诸多湖泊沉积及冰芯记录并不支持在41.0 ka青藏高原完全阻碍了西南暖湿气流进入中国西北地区这个时间节点，如色林错[31-32]。其次，相对于隆升山脉阻碍暖湿气流进入中国西北地区，来自北方蒙古—西伯利亚地区的冷高压更有可能促使巴丹吉林沙漠41.0 ka左右的气候突变，西伯利亚高压增强的影响则不受地形地貌限制。

5　结 论

（1）巴丹吉林沙漠末次冰期沉积物细粒组分中的微量元素指标对气候的敏感度高于粗粒组分。

（2）与附近高大沙山的对比结果指示古湖泊形成于66.8 ka之后，66.8 ka之前为湖泊基底。

（3）巴丹吉林沙漠东南缘41.0 ka前后从暖湿突变为干冷气候可能是该时期的西伯利亚高压系统增强所致。

参考文献（References）

[1]　Yang X, Scuderi L, Paillou P, et al. Quaternary environmental changes in the drylands of China: A critical review[J]. Quaternary Science Reviews, 2011, 30(23-24): 3219-3233.

[2]　Li Z, Wang N, Li R, et al. Indication of millennial-scale moisture changes by the temporal distribution of Holocene calcareous root tubes in the deserts of the Alashan Plateau, northwest China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 440: 496-505.

[3]　孙庆峰, 陈发虎, 李孝泽. 巴丹吉林沙漠第四纪研究评述与讨论[J]. 干旱区研究, 2008, 25(2): 304-310. [Sun Qingfeng, Chen Fahu, Li Xiaoze. Review and discussion about the progress of Quaternary research of the Badain Jaran Desert, China[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(2): 304-310.]

[4]　Liu S, Lai Z, Wang Y, et al. Growing pattern of mega-dunes in the Badain Jaran Desert in China revealed by luminescence ages[J]. Quaternary International, 2015, 410: 111-118.

[5]　Wang F, Sun D, Chen F, et al. Formation and evolution of the Badain Jaran Desert, north China, as revealed by a drill core from the desert centre and by geological survey[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 426: 139-158.

[6]　Wang N, Ning K , Li Z, et al. Holocene high lake-levels and pan-lake period on Badain Jaran Desert[J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(8): 1633-1641.

[7]　赵力强, 张律吕, 王乃昂, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊形态初步研究[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1001-1011. [Zhao Liqiang, Zhang Lvlv, Wang Nai'ang, et al. Morphology of the lakes in the Badain Jaran Desert[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1001-1011.]

[8]　Jin K, Rao W, Guo Q, et al. Understanding recharge of soil water in a sand dune at the Nuoertu of Badain Jaran Desert using isotopes of H and O[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chem-

istry, 2018, 318: 1063-1075.

[9] Li Z, Chen Q, Zhang C, et al. Environmental significance of the chemical composition of sediments in groundwater-recharged lakes of the Badain Jaran Desert, NW China[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2019, 20(2): 1026-1040.

[10] Hu F, Yang X. Geochemical and geomorphological evidence for the provenance of aeolian deposits in the Badain Jaran Desert, northwestern China[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 131: 179-192.

[11] Liu W, Jiang H, Shi C, et al. Chemical and strontium isotopic characteristics of the rivers around the Badain Jaran Desert, northwest China: Implication of river solute origin and chemical weathering [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(15): 1119.

[12] Wang Z, Chen T, Liu S, et al. Aeolian origin of interdune lakes in the Badain Jaran Desert, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(3): 190.

[13] Zhao T, Liu W, Xu Z, et al. Cosmogenic nuclides (^{10}Be and ^{26}Al) erosion rate constraints in the Badain Jaran Desert, northwest China: Implications for surface erosion mechanisms and landform evolution[J]. Geosciences Journal, 2018, 23(1): 59-68.

[14] Yang Y, Li B, Qiu S, et al. Climatic changes indicated by trace elements in the Chagelebulu Stratigraphic Section, Badain Jaran Desert, China, since 150 kyr BP[J]. Geochemistry International, 2008, 46(1): 96-103.

[15] Guo Y, Li B, Wang F, et al. Holocene millennial-scale climate variations from the record of primary chemical elements in Badain Jaran Desert, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9 (1): 51.

[16] Li Z, Wei Z, Dong S, et al. The paleoenvironmental significance of spatial distributions of grain size in groundwater-recharged lakes: A case study in the hinterland of the Badain Jaran Desert, northwest China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43 (8): 363-372.

[17] Yang X, Man, Dong J, et al. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China[J]. Quaternary Research, 2010, 73(1): 10-19.

[18] Yang X, Williams M. The ion chemistry of lakes and Late Holocene desiccation in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China[J]. Catena, 2003, 51(1): 45-60.

[19] 王涛. 巴丹吉林沙漠形成演变的若干问题[J]. 中国沙漠, 1990, 10(1): 29-40. [Wang Tao. Some problems on the formation and evolution of Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research, 1990, 10(1): 29-40.]

[20] Fan X, Zhang X, Tian M. Climate change during the last glacial period on the southeast margin of Badain Jaran Desert, northwest China[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(10): 2379-2388.

[21] 朱立平, 王君波, 陈玲, 等. 藏南沉错湖泊沉积多指标揭示的2万年以来环境变化[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 514-524. [Zhu Liping, Wang Junbo, Chen Ling, et al. Environmental changes in the past 20,000 years revealed by multiple indicators of sedimentation in the faulted lakes in southern Tibet[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4): 514-524.]

[22] 李培泉, 刘志和, 卢光山, 等. 冲绳海槽沉积物中U,Ra,Th,~(40)K的地球化学研究[J]. 海洋与湖沼, 1984, 15(5): 457-467. [Li Peiquan, Liu Zhihe, Lu Guangshan, et al. Geochemical study of U,Ra, Th,~(40)K in Okinawa trough sediments[J]. Oceans and Lakes, 1984, 15(5): 457-467.]

[23] Hess J, Bender M, Schilling J. Evolution of the ratio of Strontium-87 to Strontium-86 in seawater from Cretaceous to present[J]. Science, 1986, 231(4741): 979-984.

[24] 范小露, 田明中, 刘斯文, 等. 巴丹吉林沙漠东南部末次间冰期环境演变: 来自粒度、光释光(OSL)及14C测年的证据[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 892-900. [Fan Xiaolu, Tian Mingzhong, Liu Siwen, et al. Environmental change of southeastern Badain Jaran Desert during the last interglacial: Evidences from the grain-size analysis, optically stimulated luminescence and radiocarbon dating [J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 892-900.]

[25] 沈吉, 吕厚远, 王苏民, 等. 错鄂孔深钻揭示的青藏高原中部2.8 MaBP以来环境演化及其对构造事件响应[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(4): 359-366. [Shen Ji, Lyu Houyuan, Wang Sumin, et al. Environmental evolution and its response to tectonic events since the 2.8 MaBP in the central Qinghai-Tibet Plateau revealed by the deep drilling in chokang[J]. Science in China (series D), 2004, 34(4): 359-366.]

[26] Obreht I, Hambach U, Veres D, et al. Shift of large-scale atmospheric systems over Europe during late MIS 3 and implications for modern human dispersal[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 5848.

[27] 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 381-391. [Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian, et al. Strong uplift of the late Cenozoic Qinghai-Tibet Plateau and its influence on the surrounding environment[J]. Quaternary Research, 2001, 21(5): 381-391.]

[28] Hao Q, Wang L, Oldfield F, et al. Delayed build-up of arctic ice sheets during 400,000-year minima in insolation variability[J]. Nature, 2012, 490: 393-396.

[29] Li Y, Song Y, Fitzsimmons K, et al. Eolian dust dispersal patterns since the last glacial period in eastern Central Asia: Insights from a loess-paleosol sequence in the Ili Basin[J]. Climate of the Past, 2018, 14: 271-286.

[30] 刘浩, 贾佳, 路彩晨, 等. 则克台黄土粒度组分分离及其记录的末次冰期气候波动[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1260-1269. [Liu Hao, Jia Jia, Lu Caichen, et al. Multi-components separation of loess grain size in Zeketai and the recorded climate fluctuation during the last glacial period[J]. Arid Land Geography, 2018, 41 (6): 1260-1269.]

[31] Li D, Li Y, Ma B, et al. Lake-level fluctuations since the Last Glaciation in Selin Co (lake), Central Tibet, investigated using optically stimulated luminescence dating of beach ridges[J]. Environmental Research Letters, 2009, 4(4): 045204, doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045204.

[32] 杜丁丁, Muhammad S, Dembele B, 等. 青藏高原中部色林错湖泊沉积物色度反映末次冰盛期以来区域古气候演化[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 551-558. [Du Dingding, Muhammad S, Dembele B, et al. Paleoclimatic changes reflected by diffuse reflectance spectroscopy since Last Glacial Maximum from Selin Co Lake sediments, central Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 551-558.]

Geochemical characteristics and paleoclimatic significance of the last glacial sediments in the southeastern margin of Badain Jaran Desert

FAN Xiaolu[1,2], ZHANG Xinyi[1,2], TIAN Mingzhong[3]

(1. School of History Culture and Tourism, Fuyang Normal University, Fuyang 236037, Anhui, China;
2. The Center of Cultural Research in Northern Anhui, Fuyang Normal University, Fuyang 236037, Anhui, China;
3. School of Earth Science and Resource, China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Abstract: Reconstructing the desert paleoclimate is critical for understanding paleoclimate evolution. As the third-largest desert in China, the Badain Jaran Desert's mega dune is the highest in China and the world and unique for its crowded mega dunes. This region's geology and environmental information are challenging to acquire. By using innovative methods and techniques to study the Badain Jaran Desert's climate change, research will significantly influence climate studies in the northwest arid area and even East Asia. The climate evolution model during the last glacial period (66.8−41.0 ka) in the Barunbaoritaolegai (BRBG) section in the southeastern margin of the Badain Jaran Desert was reconstructed using whole-sample geochemistry, granular-scale element geochemistry, and Sr isotope analysis. During 66.8−41.0 ka, the residual components showed high Sr/Ca values, whereas acid-soluble and residual components showed low Ba contents, indicating enhanced chemical weathering and increased lake supply, reflecting the characteristics of a warm and humid climate. The trace element changes indicate that trace elements in the fine grain components of sediments are more sensitive to climate than the coarse ones. Although the geochemical indices from the entire sample show little obvious feedback, the other innovative technique used in this study suggests higher efficiency and more sensitivity to environmental variation. Therefore, this approach could be used in future studies on climate and environmental variation. Based on the experimental outputs, the K and Sr concentrations in the residual components of fine fraction (<125 μm), the Sr/Ca values of residual components of fine fraction (<125 μm), the K concentrations in the acid-soluble components of the coarse fraction (>125 μm), and the Al concentrations in both acid-soluble and residual components of the coarse fraction (>125 μm) are the typical sensitive chemical indicators of climate change. The research group found that fine-sized fractions in the sediments are sensitive to climate change, which is an ideal media to reflect environmental vibration. By introducing novel ideas to climate-related research, the team discovered that Ba variations in acid-soluble fractions are highly sensitive, whether in fine or coarse grain-sized sediments. The $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratio of sediments from the inland lake is a critical indicator of chemical weathering intensity. The ratio change in acid-dissolved components indicates a change in strontium in the deposition area, whereas the ratio change in residual components reflects a change in strontium in the source area. The opposite trend is evident for the strontium ratio, showing that the response of different sediment components to chemical weathering is different in the provenance and sedimentary regions. Sr isotope results show that the $^{87}Sr/^{86}Sr$ value reached a maximum at ~66.8 ka, which could be related to the increase in lake water salinity. Furthermore, most indicators show a sudden climate change at ~41.0 ka, and the study indicates that the abrupt change from warm wet climate to dry cold climate at ~41.0 ka in the southeastern margin of Badain Jaran Desert might be caused by the enhancement of a Siberian high-pressure system in this period.

Key words: last glacial period; geochemical; paleoclimate; Siberian high pressure system; Badain Jaran Desert